



TITLE:

# 物理学と数学の相互作用についての個人的回想(量子情報理論とその応用)

AUTHOR(S):

豊田, 利幸

---

CITATION:

豊田, 利幸. 物理学と数学の相互作用についての個人的回想(量子情報理論とその応用). 数理解析研究所講究録 1994, 859: 143-173

ISSUE DATE:

1994-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/83808>

RIGHT:

物理学と数学の相互作用についての個人的回想

明治学院大学 豊田利幸 (Toshiyuki Toyoda)

人口に膾炙しているガリレオの言葉、「私が宇宙と呼ぶこの  
の壮大な書物の哲学は数学の言葉で書かれている」の出典は、

La filosofia è scritta in questo grandissimmo  
libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli  
occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere  
se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer  
i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in  
lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi,  
ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è  
impossibile a intenderne umanamente parola; senza  
questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro  
laberinto. (Il Saggiatore)

Le Opere di Galileo Galilei, Nuova Ristampa Edizione  
Nazionale, Firenze, G.Barbèra Editore, 1968, VI, p.232

であるが、実はこれと同趣旨のことをガリレオはいたるところで述べている。その一つの箇所では、「数学の言葉」をさらに具体的に説明し、論証で用いるべき論理(logica)は数学のそれではなければならない、そこでは、使用する言葉の定義(le definizioni de' termini)の可能な限りの明確化が必要である、と述べている(前掲 Le Opere, IV, p.700)。

新しい科学(nuova scienza)、端的には近代物理学の建設にあたって、ガリレオをつき動かしていた「数学(matematica)」とは何であったか？それは上の引用文から容易に推察されるようにユークリッドの「原論(Στοιχεῖα)」であった。19才になって初めてこの本に接したガリレオは、そこに提示されているほとんど完璧ともいえる論理体系とその実用面における絶大な効用に感動し、終生これを理論構築の範とした。古くから、聖書とならんで「ベストセラー」とされていた「原論」を「自然という書物(il libro della Natura)」と結びつけることによって、ガリレオは nuova scienza の理論体系の基礎を築いたのであった。自然に関する知識の集積とその系統化という段階から、多様な現象を法則を媒介にして包括的に理解しようとする人間の知的な営みの第一歩が、数学に凝縮された論理に依拠して踏み出されたのであった。

さらに付言すれば、そこには数学 ( $\mu\alpha\theta\eta\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{o}\varsigma$ ) の原義である「学びうること」の精神が脈動していた。ガリレオはこれに「頭脳を与えられているすべての人間に」を付け加え、*nuova scienza* の基本理念とした。そして、それは誰でも学ぶことができる、すなわち理解できるものであるが、同時に幾何学を学ぶときと同じように、そこに述べられていることからすべてを「注意深く」学ぶ必要がある、と述べている（例えば *Le Meccaniche* の序文の末尾）。

枕詞が少し長くなったが、標記の主題に入る前に、それと密接に関係すると思われるその歴史的背景を短くまとめておこう。

奇しくも 1900 年、量子論の幕開きとなったプランク (Max Planck, 1858-1947) による量子の発見がなされた同年、量子力学の基本的枠組みを与えるヒルベルト空間論がヒルベルト (David Hilbert, 1862-1943) によって構築された。後者は積分方程式やフーリエ級数の理論を統一的に展開するために出された関数空間論であり、これが量子論と結びつくようになろうとは、当時誰も予想しなかったに違いない。また翌 1901 年にはルベーグ (Henri Lebesgue, 1875-1941) が測度の概念を導入し、物理学で後になって重用されるルベー

グ積分論を展開した。

実は、物理学を意識して書かれた数学者の論文としてはそれより少し前の1892年に発表されたリーマン (Georg Friedlich Riemann, 1826-1866) の “Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen” がある。空間の本質を深く洞察したこの論文はアインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) が一般相対性理論を提案し、それによって重力場を説明しようと試みた頃 (1914年) から、物理学にも強い関心をもっていたワイル (Hermann Weyl, 1885-1955) によって新しい視点からとりあげられ、彼はアインシュタインに先立って重力と電磁場の統一理論を発表した (Gravitation und Elektrizität, 1918)。その中で彼は物理の実験的事実 (マイケルソン・モーレーの実験) にできるだけ忠実であろうとする立場からゲージ変換を導いた (詳しくは岩波講座『現代物理学の基礎 古典物理学Ⅱ』pp.91-98参照)。それは当時物理学者の間に定着しつつあった

$$ds^2 = \sum_{i, \kappa} g_{i\kappa} dx_i dx_\kappa = \text{inv.}$$

ではなく

$$\sum_{i, \kappa} g_{i\kappa} dx_i dx_\kappa = 0$$

こそが“光速度不変”の物理的要請に忠実ではないか、という発想から出たものであった。この理論は古典的な場としての重力場と電磁場を幾何学的に統一する理論として嘆賞に値するものであったが、アインシュタインの強い反発を買い、物理学者の間では長く受け入れられなかった。その間の事情については、ワイルが自ら選んだ論文集 *Selecta Hermann Weyl*, ed. by Eckermann, B., Birkhäuser 1956 に収録されている上記論文に彼が死の直前付記した *Nachtrag Juni 1955* に簡潔に、しかし極めて印象的に述べられている。とにかく、こうして「一般相対論」は微分幾何学者の手に渡り、天体物理学者の興味を惹くようになったのは、それからかなり後になってからであった。

私が（旧制）中学へ入った年（1933年）に読んだ本の中の次の文章は当時の状況をよく映している。

「只併し相対性理論は、近代の物理学的理論のすべてが然うでなければならぬように、その建築的構造を純粹に数学的組織のなかに見出すのである。従って数学を理解し得ない人々の間には、或はその内容に対する誤解を招いたり、又は十分の解釈のために多くの困難を感じしめたことは一通りでなかった。且つ単に数学とは云っても、従来普通に物理学の理論などに応用せられたものとやや趣を異にして、微分幾何

学や一般のテンソル計算法を新たに必要とするに至ったので、遂には『世界中に本当にこの理論を解し得る人数は恐らく一ダースを超えないであろう』とまで世上に伝えられた程であった。」

石原 純「相対性理論」

『大思想エンサイクロペディア4 自然科学』

春秋社、1929年、p. 183

一方、プランクによる量子の発見は、1905年、アインシュタインの光量子仮説、さらに1913年にはニールス・ボーア(Niels Hendrik Bohr, 1885-1962)の原子模型を導き、新しい力学体系の必要を痛感させるようになった。それは離散的なエネルギー状態を理論的に導きうるものでなければならなかった。

1925年、ハイゼンベルク(Werner Karl Heisenberg, 1901-1976)、ボルン(Max Born, 1882-)とヨルダン(Ernst Pascual Jordan, 1902-1980)、また彼等とは独立にディラック(Paul Adrian Maurice Dirac, 1902-1984)によって行列力学が提案された。そして翌1926年には、量子状態を微分方程式の固有値問題として定式化する波動力学がシュレーディンガーによって提案され、それと行列力学との数学的等価性

も示された。しかし、前者においては行列が作用するベクトル空間、後者においては微分方程式の解である波動関数、の意味は提案当初は不明であった。間もなくヨルダンによって波動関数に確率的な意味が与えられ、ディラックは変換理論によって両者の統合を試みた。

こうして一応、量子力学の骨格が出来上り、化学結合や分子構造の説明に応用された（1927年のハイトラー・ロンドンの理論）。さらに1928年、ディラックは1個の電子の相対論的な量子力学の運動方程式を書き下し、電子のスピンを理論的に導くことに成功した。

このような状況の中で、すでにRaum・Zeit・Materie(1918)、前述のGravitation und Elektrizität(1918)等の著書、論文によって物理学の研究に強い意欲を示していたワイルは、1928年、Gruppentheorie und Quantenmechanik(第1版)、ついで1930年その第2版を刊行し、群論を純粋数学の一部門と考えていた当時の理論物理学者たちに少なからぬ衝撃を与えた。それは物理学者たちの間で多少の畏怖の念をこめて使われた“グルッペン・ペスト”の流行という言葉によくあらわれている。

ワイルが上記著書の第1版の序文の中で述べている次の言葉は、今日読んでも興味深い。



“余は是非この数学と物理との戯曲 —— この両者は暗々には互に裨益し合ひながら、面と向っては互に否認し排撃し勝ちなものである —— に於て、（余の経験によれば歓迎されないことの多い）使用者の役目を演じ度いと思ふ。  
（山内恭彦訳『Hermann Weyl 群論と量子力学』p.iii）

山内恭彦先生（1902-1968）のこの訳書の初版が出たのは1932年、私が大学3年のとき購入したのはその再版（1942年）であった。

上記訳書の初版が出た年、フォン・ノイマン（Johann von Neumann, 1903-1957）は *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* を著し、これによって場の理論以前の量子力学の理論体系は、実際の理論の応用には必須な道具立てとなる摂動論的手法の基礎づけの問題は一応別として、ほぼ完璧なかたちに整備された。

さて私が第八高等学校に入学した1937年には、その2年前湯川秀樹先生（1907-1981）が理論的に予言しておられた中間子がアンダーソンによって宇宙線の霧箱写真の中に発見され、国の内外の物理学者の間で大きな反響を呼んでいた。私は、東大卒業と同時に八高に着任された栗田稔先生（1913

- )から高木貞治先生直伝の「微積分学」を習うと共に、ワイルやカラテオドリ (Constantin Carathéodory, 1873-1950) の名前およびその人たちの物理学に関係のある仕事の片鱗を伺い深い感銘を覚えた。『解析概論』の初版が出たのは2年生の夏休みであった。栗田先生の御専門は代数幾何であったが、物理学にも深い関心をもっておられ、私は友人としばしば先生のお宅を訪ね、物理学と数学の生き生きとした相互作用の一端を学んだ。

1940年、私が東京帝国大学理学部物理学科に入学した頃は、物理学科の学生向きに物理数学の講義はあったが、数学各部門の講義は数学科の学生と一緒に聴くようになっていた。私は小谷正雄先生 (1906-) の周到に準備された物理数学の講義を通じて特殊関数を学ぶとともに、弥永昌吉先生 (1906-) の幾何学の講義に出席し、新しい数学とはこういうものかと感動した。当時、理学部別館と称された木造平屋建ての粗末な教室で行われたその講義の情景を、私は今でもありありと思い出すことができる。

1931年から1934年にかけてフランスに行っておられた弥永先生は、帰国早々の東大での講義 (1935年) にヒルベルト空間論を取り上げられたと伺っていた。おそらく日本におけるヒルベルト空間論の講義はそれが最初であった

と思う。

弥永先生は講義の参考書として、Otto Schreier und Emanuel Sperner, Einführung in die Analytische Geometrie und Algebra I, 1931 をあげられたが、講義ではほとんどメモも用意されず、この本のエッセンスを明晰かつ懇切に教えて下さった。

翌1941年、弥永昌吉述『自由群論』が大阪帝国大学数講演集VIとして岩波書店から刊行された。これは弥永先生帰国後の1935年の秋、阪大理学部数学教室で5日間にわたって行われた講義を中山正(1912-1964)、浅野啓三(1910-)、角谷静夫(1911-)、小松醇郎(1909-)の四氏が筆記、添註したものである。私はその中で「結び糸(Knoten)」と「組紐(Zopf)」にとくに興味を惹かれ、いつかこの理論を物理学の問題に応用したいと思った。この夢は戦後しばらくしてささやかなかたちで実現することができた。これについては後でその契機と具体的な内容を述べることになる。

先に触れたように、私が大学に入学した頃は湯川先生のお仕事が日本の学界でも大きな注目を浴びるようになっており、物理学科の学生もできるだけ早くそれを理解したいと思っていた。たまたまその頃、渡辺慧先生(1910-)がドイツのライプツィヒから帰国され、ヨーロッパにおける湯川理論の反

響について書かれたり、話されたりしていることを知った。

私は意を決して、当時駿河台に住んでおられた渡辺先生のお宅を訪問した。ド・ブロイ (Louis-Victor de Broglie, 1892-1987) の許で H - 定理に関する輝やかしいお仕事をされ、ハイゼンベルクの許で原子核理論に関する研究をしてこられた先生を無名の若輩が訪ねる、というようなことは、当時の日本の状況を抜きにしては、ほとんど考えられないであろう。

1939年9月には第二次世界大戦が始まり、ヨーロッパ在住の日本人は外交官等少数の人々を除き帰国を余儀なくされていた。一方、国内では1931年から始まった「満州事変」がますます拡大し、大学を含めすべてが戦時色一色に染め上げられていた。在学徴集猶余の特典を与えられていた大学生にもやがて戦場に駆り出される運命が待っていた。私を含む大多数の大学生はそれをあらがい難いものと受けとめざるをえなかった。

このような状況の中で、物理学を志した学生が、せめて生あるうちに、物理学研究の第一線の仕事を理解しておきたい、と思っても不思議ではなかった。それに、他分野は知らず、物理学上の重要な発見や理解の多くは若い人々によってなされており、それらは誰にもわかるように提示している筈であると信じていた。

渡辺先生の暖い励しを受けて私は級友を誘って、中間子理論を勉強する自主ゼミを開いた。そのテキストとしてまずハイトラー (Walter Heitler, 1904-1981) の *The quantum theory of radiation*, 1936 を先生の示唆で選んだ。ついで渡辺先生のお口添えで、湯川先生にお願いして重要な中間子論文のリストを作って頂き、*Collected Papers on the Meson Theory I* (August 1942) を自主出版した。もちろんこれは自主ゼミ用のためであったが、多くの人から入手希望が寄せられた。これは当時私たちが購入できた「上海版」の洋書よりはるかに鮮明な印刷でかなり立派な装幀のものであった。戦時下、しかも学生の乏しい資金でこのようなことができたのは、級友の一人野沢豊吉君の家が印刷業を営んでいたお蔭であった。自主ゼミとしてはもう一つ、斎藤利彌君が中心となって行われた *Courant-Hilbert, Methoden der Mathematischen Physik I & II*, の輪読会があった。斎藤君は天文学科の学生であった浦太郎君とポアンカレ (Jules Henri Poincaré, 1854-1912) の *Méthodes Nouvelles de Mécanique Céleste*, 1892-99) の美しさに惹かれ、二人で熱心に読んでいた。

この前年 (1941年) にはディラックの *The Principles of*

Quantum Mechanics の第3版の邦訳（仁科芳雄、朝永振一郎、小林稔、玉木英彦共訳）の第2刷が出た。早速購入して読んだが、私にとってそれはそれまでに読んだ数学書に較べ読み易くはなかった。当時、“量子力学は理解しようとするより馴れよ”、といわれていたが、私は内心この言葉に大きな抵抗を覚えた。

その頃、東大物理学科では3年次になると、「理論」と「実験」にわかれ、それぞれ指導教官について研究の入門を手ほどきして貰うことになっていた。私は小野健一君、石黒英一君と一緒に小谷先生の指導を受けることになった。たまたま湯川先生が東大へ兼任教授として来られ集中講義をされていたので、先生が上京される折は、小谷先生の演習に出て頂き、直接湯川先生の御指導を受けることができた。

テーマの選択は私たちに任されたので、私は小野君と相談して、Élie Cartan の *Leçons sur la théorie des spineurs I: Les spineurs de l'espace a trois dimensions*, 1938 と Heisenberg und Pauli: *Zur Quantendynamik der Wellenfelder I* (1929), *II* (1930) の輪読を願い出た。それは次の理由からであった。

私たちは前掲のディラックの本によって電子のスピンおよび電子の状態をあらわすスピノールを一応学んでいたが、そ

の数学的性質をさらによく知りたと思った。たまたま図書室で見かけた上記カルタンの小冊子の序文の冒頭に、“最近、物理学者が量子力学に導入し、スピノールと呼んでいるものは、著者エリー・カルタン (Elie Cartan, 1869-1951) が極めて一般的に数学の一つの形式として 1913 年に発見していた”、と書かれているのに衝撃を受けた。さらにその本は叙述が明晰かつ懇切であり、フランス語で専門書を初めて読む私たちにも十分理解できるように思われたからである。

ハイゼンベルク・パウリの論文については渡辺先生および湯川先生からその重要性を伺っていた。その論文は前掲のハイトラーの本 (初版) の実用性に感銘を受けながらも、理論的な面で物足りなさを感じていた私たちに魅力的であった。その上、1928 年、ディラックが電子の相対論的方程式を導いた後、パウリはその磨き上げや量子力学の応用は「雑魚ども (lesser fry, mindre ånder)」に任せて、残されていた最大の問題、すなわち電磁場の量子力学に向うと宣言して上記論文をハイゼンベルクと共同で書いた、という挑発的な噂が私たちの耳にも伝っていた。後年、私はコペンハーゲンでローゼンフェルト (Léon Rosenfeld) と会ったときその事実を確認することができた。

ハイゼンベルク・パウリの論文の輪読が始まった頃からは小谷、湯川両先生の他に物理学科の先輩、加藤敏夫さん(1917-)も参加され、私たちはまたと得難い良き指導者に恵まれた。湯川先生はこの論文に深い関心をもっておられ、御自身でもこの論文の主題について研究を進めておられただけに、物静かな口調で述べられたコメントは示唆に富むものが多かった。また、加藤さんは量子力学で多用されていた摂動計算が収束についてほとんど無頓着になされているのを気にしておられ、控え目ながらもその点について疑問を出されたことが、強く印象に残っている。

私が大学に入学して2年目の暮(1941年12月8日)には、対米英戦が始まり、翌1942年6月には早くもミッドウェー海戦での日本海軍の大敗が私かに伝えられた。戦局は日々に不利となり、国内は戦時体制の強化に狂奔していた。私たちは残された時間をたえず意識しつつ、青春の情熱を上記論文の勉強に傾けた。

そのような中で、卒業を間近に控えた1943年の夏、全く予期しないことが起った。それは当時の内閣総理大臣東条英機陸軍大将が、戦局の挽回をはかるためと称して、大学院特別研究生の制度を公布し、私は幸運にもその第1期生に選



ばれたことである。これはもちろん指導教官小谷先生の暖かい御推薦によるものであり、私は卒業と同時に1942年に新設された西千葉の東京帝大第二工学部共通第一教室に教授として着任しておられた山内恭彦先生および助教授の渡辺慧先生の許で研究することになった。それは私にとって願ってもないことであった。この制度では徴集猶余期間の延長だけでなく、相当の給与もあり、さらにその頃一般の市民には困難であった国鉄乗車券購入の便宜も与えられていた。

与えられた研究題目は「核分裂反応の機構とその応用可能性について」であった。私はまずボーア・ホイーラーの理論を改良するため有限変形の原子核のクーロン・エネルギーの計算にとりかかった。そのさい寺沢寛一先生(1882-1969)が前に開発しておられた楕円関数を用いる公式が役に立った。しかし、西千葉の研究室でひとりでタイガー計算機を廻して行う数値計算は齒痒いくらい遅かった。

その頃、東京、小石川の理化学研究所仁科研究室では、朝永先生(1906-1979)をはじめとする錚々たる先生方によってウラン同位元素の分離に関する技術的可能性が検討されていた。そして当時の日本の技術ではその可能性はほとんどない、という答申が出されたことも洩れ伝わってきた。

臨界量のウラン235を取り出すことが技術的にほとんど不可能ならば、核分裂反応の軍事利用は問題にならない。山内先生は喫緊の軍事研究に切り換えるべきだという御意見であり、私は早々に報告書をまとめ前記研究を打ち切った。その報告書の末尾に、「このような理由で、核分裂反応の兵器化は実現可能性がほとんどない。しかし、もしそれが実現されたあかつきには、その絶大な破壊力のゆえに、戦争の様相は一変するであろう」と記したことを今でも鮮明に記憶している。

級友のほとんどが軍務に服しているなかで、一人、西千葉の研究室にいた私は、週に何度か西千葉に来られた徹底したリベラリストの渡辺先生からヨーロッパの物理学者たちのことを胸をときめかして聞いた。その中には、ハイゼンベルク・パウリの論文がランダウ (Lev Davidovich Landau, 1908-1968) とパイエルス (Rudolf Ernst Peierls, 1907- ) によって批判されたこと、またディラックの *The principles of quantum mechanics*, 1st ed. がワイルによってかなり痛烈に批判されたことも含まれていた。さらにディラック自身はハイゼンベルク・パウリの論文にあき足らず、フォック (Vladimir Alexandrovich Fock, 1898-1874) およびポドルスキイ (Boris Padolsky) と一緒に “On Quantum

Electrodynamics をソ連から出ていた赤い表紙の雑誌  
Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion,  
Herausgegeben vom Volkskomissariat für Schwerindustrie  
der UdSSRに発表していることも伺った。

私はその雑誌を借り出し、軍事研究の合い間に筆写し、貪るように読んだ。そして、彼等が各粒子に賦与していた時空間を連続体である電磁場の各点にまで拡げることを夢みた。ちょうどその頃、朝永先生も理研で同じような構想でお仕事をされていることを、渡辺先生を通じて知った。

すでに米軍による本土爆撃は始まっていた。もはや東京で学術的会合を開くのは危険であるという理由から、学術研究会議素粒子論班研究発表会の開催場所は西千葉の第二工学部にきまり、私はその設営を命ぜられた。戦時中最後の会となったその研究発表会は1944年11月18、19の両日、同学部本部会議室で開かれた。集ったのは湯川、朝永、山内、荒木（源太郎）、伏見（康治）、渡辺、宮嶋（竜興）、内山（竜雄）の諸先生と岩田（義一）さんおよび特研生の鈴木坦（京大）、金井英三（阪大）、の両君と私であった。この会の半月ほど前には東京爆撃のための初偵察があり、会の後五日目にはB29約70機が東京を爆撃したことも付記しておこう。

その会の2日目、私は研究発表の機会を与えられ、まだ予備的な段階にあった「一般変換関数 (generalized transformation)」について話した。一般変換関数とは、Minkowski空間における2つの space-like surfaceを  $S_1$ ,  $S_2$ とした場合、

$$\Phi(S_2) = T[S_2; S_1] \Phi(S_1)$$

$$T[S_2; S_1] = \uparrow \prod_{S_1}^{S_2} \left( 1 - \frac{i}{h} H_{12} dw \right)$$

で与えられる  $T[S_2; S_1]$  のことである。ここに  $dw$  は Minkowski 空間の「体積」要素である。私はこの空間における汎関数的微分を定義するのに苦慮していた。当時、私の知る限りこれを数学的に厳密に定式化したものはなかった。私は与えられていた軍事研究(短距離ロケット弾の弾道計算、水分子の呼吸スペクトルの計算等)のこともあり、上記研究の継続を断念した(この間の事情については武谷三男、坂田昌一、中村誠太郎編『素粒子の本質』、岩波書店、1963年、pp.33-34 参照)。

この会で強く印象に残っているのは、岩田さんがワイルの Classical Groups に触れながら、正準変換が symplectic group になっていることを明快に説明し、symplectic group の物理学における重要性を指摘されたことである。岩田さん

の話にも私のにも、先生方からのコメントはなかった。

しかし、会が終わった後、私の不躰けな願いに応じて、湯川先生は次の二首を万年筆でしたためて私に下さった。

うつそみも小さくはあらず

天地のきわみに徹る 道を思えば

秀樹

人の世を短かしといはず

永劫のまことに生きて 明日は死すとも

秀樹

戦後、混乱と虚脱状態の雰囲気の中で私は古典物理学をあらためて勉強しようと思い、かねて栗田先生からすすめられていたカラテオドリの *Geometrische Optik*(1936) を耽読した。そこに展開されていた光束の理論は、前に急いで学習した解析力学のイメージを一変させた。ラグランジュの括弧式やポアッソン括弧式の幾何学的意味、そして何よりも、実際の光学機械が正準変換の装置そのものである、という指摘に私は目を洗われた思いであった。

しかし、幾何光学がいかに美しくとも、それは物理的にはマ

クスウェルの方程式の解の近似に過ぎない。もともと私は電磁場の古典的取扱いに強い関心をもっていた。なかでもゾンマーフェルト (Arnold Johannes Sommerfeld, 1868-1951) によって展開された回折の理論は応用数学の華のように思われた。彼の著 *Theorie der Beugung* (Riemann-Webers *Differentialgleichungen der Physik II* 1927) に駆使されているリーマン面への拡張による複素積分の計算に私は陶醉した。

その頃、山内先生はわが国の教育制度、とくに自然科学の教育改革を考えておられ、広文館という小さな出版社の請を受けて『物理学汎論』の監修に携っておられた。そして私にその第6巻として『光学』を書くようにすすめて下さった。この本は私が立教大学理学部へ移る直前の1949年出版された。稚拙なものであるが、私の頭にあった物理学と数学を光学を借りて結びつけようとしたもので、私にとって忘れ難い青春の思い出である。

カラテオドリやゾンマーフェルトを一生懸命読んでいる間も、もちろん当時の素粒子論の進展には深い関心を拂っていた。それについての私の意見をここで詳しく述べている余裕はないが、一口でいえば、一見わかり易い摂動計算の図式化

に、本来最も重要なはずの収束の吟味がほとんど全く欠除していることに私は違和感を抱いていた。ある機会に、物理と数学双方に最も通じておられると尊敬していた山内先生にそのことを申し上げたら、言下に、物理と数学とは違う、物理、とくに量子力学では、たとえば2次の摂動だけでも、それが実験とよくあえば、それでいいのだよ、と論された。私は先に引用した先生訳のワイルの言葉を心の中で思い出していた。しかし、後になって、それは当時の理論物理界（国の内外を含め）の風潮に対する先生一流の皮肉であることに気がついた。

1960年、秋月康夫先生（1902-）が京大から東京教育大へ移ってこられた。先生が湯川、朝永両先生の学生時代、お二人に数学を教えられたこと、また岡潔先生（1901-）のよき理解者であったことは、その前から間接的に聞いていた。先生はその2年前に日本学術会議が政府に設置要望決議を出していた数理解析を創設する世話人として努力しておられた。そして「数理解析の健全な発展には、新しい理論物理と数学の関係を密にすべきなのに、わが国では研究者どうし互に顔さえ知らない状態であることを憂い、私（秋月先生）はそういう方面の研究会を提唱し、企画した（秋月康夫、「色即是空」、数学セミナー、1970年10月号）」

そのさい秋月先生は山内先生に相談され、山内先生から私が世話人の一人として推薦された。たまたま当時秋月先生は下落合に住んでおられ、私の家とも近かったので、それ以来お宅をよく訪問し、長時間にわたり有益なお話を伺うことができた。

実はそれより少し前から私は三村剛昂先生（1898-1965）が1935年に提唱され、戦時中広島大の数学者たちによって発展されていた波動幾何（wave geometry）を見直したいと思っていた。幸い岡林孝郎さん、村井康久さん等の賛同をえて、三村先生のお宅のすぐ近くにあった竹原の広島大理論研で1960年の夏、当時御存命だった三村先生を中心に4日間にわたる研究会を開いた。

その頃、日本の物理学者の間では波動幾何に対する関心は薄れていたが、私は波動方程式の積分条件についての深い研究から多くを学んだ。それは中村弘君と Connection of spinor fields (1961)を書くとき役に立った。

上記竹原の会の1月後、秋月先生の肝いりで「数理科学総合班第1班」のシンポジウムが箱根の強羅で3日間にわたって開かれた。私は岡林さん、中野薫夫さん、故池田峰夫さん等と参加した。この研究会は次の年の6月にも熱海で開かれ、岡林さん、村井さん、池田さんの他に杉浦光夫さん、久賀道



郎さん、長野正さん、吉沢尚明さん等気鋭の数学者も加わり、夜を徹して議論した。当時若くて元気な数学者の方々から、リーマンやワイルの時代と違って数学はいまや物理から独立し、数学それ自体の中から問題を選んで研究している、したがって物理学者と協力する必要も余裕もない、という率直かつ強烈な意見が続出した。

そこで私は、岡林さん、村井さんと相談して、物理学者を中心とする数理科学総合研究班の研究会を1961年6月、本郷の学士会館で開くことにした。「素粒子の基礎方程式」と題する3日間にわたる討議の報告書をガリバン刷で出して、私の上記総合研究班における仕事の幕はおりた。

当時をふりかえると、わが国の素粒子論グループ内では mathematical approach は敬遠あるいは軽視され、unified theory の試みにいたっては“神様の摂理”などという蔑称さえ奉られていた。私は1957年から58年にかけてCERNに滞在中、インフェルト (Leopold Infeld) とファン・デア・ヴェルデン (Bartel Leendert van der Waerden, 1905-) の共著論文 Die Wellengleichung des Elektrons in der allgemeinen Relativitätstheorie, 1933 に展開されている coordinate transformation と parallel transformation の統合に強く惹かれ、そこに出てくる

spinor field の connection の自由度を利用して A Unified Theory of the Fermi Interaction 1958 を書いたが、このような approach に共感をもってくれる人はローゼンフェルトを除いてほとんどいなかった。多くの人は“unified”という言葉に初めから胡散くささを感じとっていたかのようである。

折から、続々発見された素粒子の分類に  $SU(3)$  をはじめとするリー群の表現を使うことが世界的に大流行した。リー群に不馴れな物理学者のため Reviews of Modern Physics はその解説論文を載せたりした。そのようなこともあって、私は、1963年9月から翌年8月までイタリアのパドヴァ大学(Università di Padova)で、また1966年9月から翌年8月までノールウェーのトロンハイム(Trondheim)の理論物理学研究所で Introduction to Lie Groups and Lie Algebras for Application to Physics の講義を依頼された。トロンハイムにおける講義はラヴンダール(Finn Ravndal, 現オスロ大学教授)君が克明にノートをとってくれ、Arkiv for Det Fysiske Seminar i Trondheim, No.9, 1966 としてささやかなかたちで出版された。

その講義をしているある日、ディラックから聞いたという「回転による糸のよじれを回転なしにほどく遊び」が伝って

きて、研究所の皆がその遊びに興じていた。それは2本の糸を $2\pi$ の偶数倍回転してできるよじれはほどけるが $2\pi$ の奇数倍でできるよじれはほどけない、というものである。私は学生時代に読んだ前掲の『自由群論』を思い出し、そこで使われていた「操作記号」を用いて理論的に証明することができた（数学セミナー '68-4, pp.19-24 参照）。それは3次元回転群の2価表現である電子のスピンを「視覚化（Visualize）」するものであり、私は、上記講義にとり入れるとともにヨーロッパで折に触れて話した。

ついでにもう一つの群論の面白さに関する挿話を紹介しておこう。私は学生時代、群論を学び始めた頃、何か身のまわりで群論が応用できる例はないか、と探していた。級友の小野健一君、生源寺治雄君も同じようなことを考えていた。そして遊びの一つ「三山崩し」の必勝法の操作が群になっているのではないかと思い、3人でいろいろ考えた。一番苦労したのは「結合法則」の証明であったが、何とか解決した。この群の「表現」は実例がわかっていたので難しくはなかった。

その後、このことはほとんど忘れていたが、1963年パドヴァ大学に滞在中、コーヒーの時間に実験物理のメゼッティ（Luigi Mezzetti）教授から当時評判の映画 *L'année derrière à Marienbad* に出てくる三山崩しの話が出、私は

その遊びならすでに解いたと答えた。需められるままにかなり時間をかけて説明した。メゼッティ教授は私にその内容をイタリア語で書いて、イタリア物理学会の *Giornale di Fisica* に発表するようにすすめられた。私はその機会に *n* 山崩しまで拡張し、原稿を教授に渡して帰国した。(前掲同誌 7 巻 1 号 (1966) pp.3-10 に発表)。それは私の単名論文になっているが、もともと小野、生源寺両君および栗田先生から有益な助言をえて完成していたものであった。

さて、1960年代の終りに近くなって、物理学と数学の関係を実践的に考える得難い機会が訪れた。1969年4月、岩波書店の小川豊さんが、新しい理論物理学講座刊行の企画をもって湯川先生宅を訪れ、種々相談され、先生にその監修を懇請された。先生はそれを引き受けられ、私を編集委員の一人に加えられた。

この企画は岩波講座「現代物理学の基礎(全12巻)」として、1972年4月から第1版の配本が始まった。そして第2版は1978年1月から刊行されたが、その間、私は寸暇を惜んで編集と執筆に微力を傾けた。

上に述べた企画が始まった丁度その頃、渡辺先生の独創性に満ちた *Knowing and Guessing* (1969) が世に出、私は深

い感銘を受けていたので、編集を任された「古典物理」と「量子力学」の巻は類書にない理論物理学的性格を積極的にとり入れることにした。いいかえれば数学的厳密さと理論の概念構成をできるだけ重視することにした。幸い、並木美喜雄さん、江沢洋さん等よき執筆者に恵まれ、所期の目的を達することができたと思っている。

私は、物理学の理論は絶えず発展、深化してゆくものであり、「古典物理学」といえどもいわんや「量子力学」もその例外ではない、と考えていたので講座の中でそのことを具体的に示すよう努力した。これによって若い読者に、古典物理学や量子力学の理論体系にも、まだ研究の余地は多く残されていることを知らせ、研究の意欲をかき立てることが有意義であると信じた。

例えば、連続体の力学で導かれる一様かつ等方的な媒質中での波動方程式の解で、形と大きさを変えないで進行するのは平面波に限る、ことは誰も厳密に証明していなかった。その証明が載っている「古典物理学Ⅰ」は1975年3月刊行されたがそれに気付いた人はほとんどいなかったように思う。（後に American Journal of Physics, Vol.47, No.9 September 1979 に Theorem on plane wave solutions として発表）。

量子力学の巻の編集、執筆に当っては、情報、論理、表現を一つの理論体系の中に包括することを目指した。それは私自身が量子力学を勉強するさい味った苦しみを若い世代の読者に経験させたくなかったからである。幸い、渡辺先生の前掲書 *Knowing and Guessing* はその試みを独自のスタイルで提示しており、私はそれを基本的な手本としつつ、私なりの方法で量子力学の基礎を定式化しようと思った。

第一に、なぜ Hilbert 空間が量子力学に必要となったか、を論理構造の面からわかり易く説明することに努力した。必

第二に、その表現として導かれる射線表現が、従来の教科書には断りなしに使われている、ベクトル表現といかなる場合に同値になるかを Bargmann, V. の論文に依拠しつつ、物理的ないくつかの例によって明らかにした。そのさい、私が物理学で最も重要なものの一つと考える Galilei 変換が上記同値条件を満たさず、その射線表現は量子力学で決定的な役割を担う正準交換関係を導くことを“発見”した。後で全く異なった立場から、Hamermesh, M. が同じ結果をえていることを知った。これも講座執筆中の知的興奮に満ちた日々の一駒であった。

すでに与えられた時間を超えているので、私のささやかな回想談の主題に関連して、中西襄さん訳の「自然科学におけ

る数学の有効性について」と題する Eugene P. Wigner のエッセー（科学、1961年9月号所収）をあげておきたい。原題には、有効性（Effectiveness）の前に "unreasonable" という形容詞がついている。講演に先立って中西さんに確めたところ、編集部の意嚮で削ったとのことであった。私には原題の「数学の途方もない有効性」の方がいいえて妙であるように思われるが、いかがであろうか。

顧みれば、私は戦時中、数学と関係の深い理論物理学の道を選び、これまで述べたように、またとない先生方とよき友に恵まれた。また戦後、いくつかの僥倖が重なって、ニールス・ボーア、ディラック、ハイゼンベルク、パウリ等文字通り大先達に直接会って貴重な話を聞くことができた。それらについてはいずれ書き残しておきたいと思う。

一方、敗戦直後から、私の胸には戦争で若い生命を失った親しい友人そして無残に死んでいった多くの同胞に対する痛恨の思いが絶えず去来した。私は戦時中、他の人々よりはるかに恵まれた境遇を享受したことに後めたさを感じていただけに、戦後は研究時間の半分近くを割き、二度とあのような戦争を起さないようにするため、私にできることとして、核廃絶を中心とする平和時代創造への努力をしてきた。ここで

も私は湯川先生から終始暖い励ましと助言を受けることができた。もちろんその間も、理論物理学の発展には私なりに大きな関心を拂ってきた。それは残された私の人生にとって最大の心の支えであったからである。

そのような私に、物理学と数学の相互作用を身をもって実践しつつある方々が集るこのような研究会にその発足当初から声をかけて下さり、今回は私の古稀を記念して、貴重な時間を割いてこのような講演の機会を恵与された、小嶋泉さん、大矢雅則さんをはじめとする世話人の皆さんに心からの謝意を表したい。

最後に、ガリレオにあやかって一言、

La teoria di fisica è scritta in  
lingua matematica.

La natura ha dato ognuno il cervello  
da poterle intendere e capire.

(1991・3・19)